

Научноёмкие технологии в машиностроении. 2022. №5 (131). С. 20-26.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2022. №5 (131). P. 20-26.

Научная статья
УДК 621.791/621.78
doi: 10.30987/2223-4608-2022-5-20-26

Сравнительная оценка влияния технологий аддитивного синтеза на количество и размер пор в изделии

Андрей Викторович Киричек¹, д.т.н., Олег Николаевич Федонин², д.т.н.,
Светлана Олеговна Федонина³, к.т.н., Алексей Григорьевич Сергеев⁴, ведущий инженер
^{1,2,3,4}Брянский государственный технический университет, Брянск, Россия
¹avkbgtu@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-3823-0501>
²rector@tu-bryansk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3511-699X>
³fedonina.sv2015@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-0472-4845>
⁴sergeev-san@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

Аннотация. Приведен сравнительный анализ пористости образцов, синтезированных из порошка и проволоки. Показана более высокая эффективность проволочных аддитивных технологий, при реализации которых обеспечивается значительно меньший размер пор и занятый ими объем. Установлено, что применение послойного или периодического волнового деформационного упрочнения позволяет добиться снижения не менее, чем в 2 раза размеров пор и в 3 раза количества пор, по сравнению с синтезом изделий из проволоки тем же методом на тех же наиболее рациональных режимах.

Ключевые слова: аддитивные технологии, синтез, порошок, проволока, пористость, упрочнение, волна деформации

Для цитирования: Киричек А.В., Федонин О.Н., Федонина С.О., Сергеев А.Г. Сравнительная оценка влияния технологий аддитивного синтеза на количество и размер пор в изделии // Научноёмкие технологии в машиностроении. – 2022. – №5 (131). – С. 20-26. doi: 10.30987/2223-4608-2022-5-20-26.

Original article

Comparative evaluation of the effect of additive synthesis technologies on the number and size of pores in the product

Andrey V. Kirichek¹, Dr. Sc. Tech., Oleg N. Fedonin², Dr. Sc. Tech.,
Svetlana O. Fedonina³, Can. Sc. Tech., Alexey G. Sergeev⁴, Senior Engineer
^{1,2,3,4}Bryansk State Technical University, Bryansk, Russia
¹avkbgtu@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-3823-0501>
²rector@tu-bryansk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3511-699X>
³fedonina.sv2015@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-0472-4845>
⁴sergeev-san@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

Annotation. A comparative analysis of samples porosity, synthesized from powder and wire is given. A higher efficiency of wire additive technologies, the implementation of which results in a significantly smaller pore size with reduced volume occupied by them, is shown. It is concluded that the use of layer-wise compaction or periodic undular strainer-hardening allows for achieving, at least 2 times, size loss of pores and 3 times reduction in the number of them, compared to the synthesis of wire products using the same method in similar most rational modes.

Keywords: additive technologies, synthesis, powder, wire, porosity, hardening, deformation wave

For citation: Kirichek A.V., Fedonin O.N., Fedonina S.O., Sergeev A.G. Comparative evaluation of the effect of additive synthesis technologies on number and size of pores in the product. / Science intensive technologies in Mechanical Engineering, 2022, no.5 (131), pp. 20-26. doi: 10.30987/2223-4608-2022-5-20-26.

Введение

Аддитивные технологии – одни из наиболее интенсивно развивающихся технологий в современном мире и на сегодня находятся в стадии активных исследований. Аддитивные технологии находят все более широкое применение в промышленности, благодаря возможности создания изделий сложной конфигурации, которую зачастую невозможно получить традиционными методами [1].

Одним из наиболее важных достоинств аддитивных технологий является быстрая подготовка производства. Получение прототипа даже простой формы традиционными способами (литье; деформация; термообработка; механическая обработка) занимает от нескольких недель до нескольких месяцев. При этом необходимо учитывать большие затраты на изготовление требуемой технологической оснастки. При использовании же современных методов аддитивного производства в первую очередь требуется лишь наличие оборудования, позволяющего производить печать изделия, и открытого программного обеспечения, дающего возможность корректировки технологических параметров печати для подбора наиболее оптимального режима [2].

Несмотря на стремительное развитие и внедрение в производство технологии 3D-печати металлических изделий, мировые лидеры в этой области сталкиваются с серьезными научно-технологическими вызовами и проблемами, требующими углубленного понимания происходящих процессов, существенно отличающихся от традиционных технологий. Вследствие недостаточного качества, твердости и прочности синтезируемого изделия, присущего всем аддитивным технологиям, до сих пор сохраняется трудно преодолимое процентное соотношение между синтезируемыми моделями (прототипами) и деталями, составляющее от 60/40 до 80/20 даже в передовых странах мира.

В большинстве случаев низкий уровень твердости и прочности является следствием формирования нерациональной микроструктуры материала и (или) наличия внутренних дефектов в наплавленном материале (пористости; несплошности; микротрещин; раковин; полостей и т.д.). Проблема пористости синтезированных деталей связана с физикой аддитивного процесса и имеет место всегда, вне зависимости от применяемого сырья. Микро-

структура синтезированной детали содержит удлиненные кристаллиты больших размеров, схожие с кристаллитами, формирующимися в процессе литья. Такая структура негативно сказывается на механических свойствах материала, которые, как правило, соответствуют свойствам литого материала, а в лучшем случае, нижнему уровню диапазона свойств проката.

Методы синтеза деталей

подавляющее большинство известных в настоящее время аддитивных технологий используют порошок в качестве исходного материала в процессах синтеза деталей. В зависимости от метода сплавления порошкового материала выделяют селективный и директивный методы. Кардинальное отличие директивного метода – прямое выращивание детали с небольшими отходами материала [3].

Специфика выращивания деталей из порошка селективными методами в большинстве случаев заключается в нанесении порошка на всю опорную поверхность с равномерным распределением по требуемой площади, спекание объема порошка, соответствующего выращиваемой детали, нанесение нового слоя порошка и т.д. В зависимости от применяемого метода используют различные источники энергии: электронные излучатели (электронные пушки) при синтезе методом EBM (Electron Beam Melting – электронно-лучевая плавка), лазер при наплавке SLM (Selective Laser Melting – селективное лазерное плавление) и т.д. Процесс DED (Directed energy deposition) или процесс направленного энерговклада [4] основан на расплавлении металла по мере его нанесения за счет тепловой энергии, направленной в узкую, сфокусированную на месте подачи порошка область.

Результат синтеза деталей из порошка зависит от расположения и ориентированности частиц порошка в заданном объеме, что определяется конфигурацией и качеством используемого сырья. Вследствие этого к нему предъявляются высокие требования по сферичности, однородности размеров, мелкодисперсности (с равномерным распределением фазовых составляющих), а также минимальному количеству растворенного газа [5]. При синтезе из порошков со сложным химическим составом зачастую требуется его подготовка или изготовление смеси из нескольких порошков [6], что негативно влияет на продолжи-

тельность и стоимость процесса подготовки.

Вследствие формообразования синтезированного изделия по механизму полного и неполного сплавления отдельных гранул порошка и их агломераций, появление пор и полостей в синтезированном материале неизбежно. О качестве синтезированной детали и степени совершенства технологического процесса синтеза можно судить по количеству и среднему характерному размеру пор.

Постепенно более перспективные технологии синтеза деталей из проволоки вытесняют порошковые аддитивные технологии. Проволочные аддитивные технологии, по сравнению с порошковыми, имеют меньшую точность, но многократно более высокую производительность (до 600 см³/ч) и практически не имеют ограничений по размерам выращиваемых изделий. Стоимость проволоки в 10 – 17 раз ниже стоимости порошка, а производительность оборудования, использующего проволоку в качестве модельного материала, в 3 – 10 раз выше. В виде проволоки доступны материалы более широкого спектра.

Синтез деталей из проволоки имеет свои особенности. Выращивание производится нанесением расплавленного объема металлической проволоки на подложку (при изготовлении новой детали) или на готовую деталь (при ремонте и восстановлении) послойно методом электродуговой сварки плавящимся электродом в среде активных или инертных газов.

Наиболее часто применяются следующие технологии: EBAM (Electron Beam Additive Manufacturing); 3DMP (3D Metal Print) или WAAM (Wire+Arc Additive Manufacturing) [7, 8], а также их модифицированный вариант – CMT (Cold Metal Transfer). CMT основан на механизме управляемого режима передачи металла в сварочную ванну за счет использования импульсного тока и возвратно-поступательного движения проволоки. WAAM может применяться с различными источниками энергии, включая газовую дуговую сварку (GMAW) [9], газовую вольфрамовую сварку (GTAW) [10] и плазменную сварку (PAW) [11, 12].

При реализации проволочных аддитивных технологий монолитное изделие получается многослойной наплавкой. Происходящие при этом физические процессы предполагают образование общей ванны расплава между слоями выращиваемого изделия, что неизбежно сопровождается интенсивным нагревом детали, в тело которой отводится основной тепло-

вой поток. Избыточная теплонапряженность процесса при нерационально подобранных режимах аддитивного синтеза приводит к перегреву и, как следствие, высокой «текучести» материала, потере правильной геометрической формы детали непосредственно в процессе синтеза или короблению детали после охлаждения. В связи со стремлением снизить теплонапряженность процесса до минимально необходимой (пример – метод СМТ), существует вероятность как неполного сплавления капель и слоев с образованием полостей значительных размеров между ними, так и возникновения краевых эффектов – формирование карманов по краям синтезированных слоев материала.

Причинами возникновения пор в проволочных аддитивных технологиях может являться как неудачно выбранный газ или недостаточно эффективная защита сварочной ванны рабочей газовой средой, так и процессы газообразования, связанные с кристаллизацией металла и его аллотропическими превращениями. Достаточно большое влияние оказывает также траектория движения проволочного фидстока и наличие осцилляции [13].

Таким образом, поры и полости в синтезированных изделиях достаточно частое сопутствующее и нежелательное явление для всех методов синтеза. Размер и количество этих внутренних дефектов во многом определяет уровень механических свойств материала изделия.

Целью работы является сравнительный анализ пористости образцов, изготовленных как порошковыми методами, так и синтезом из проволоки.

Результаты и обсуждение

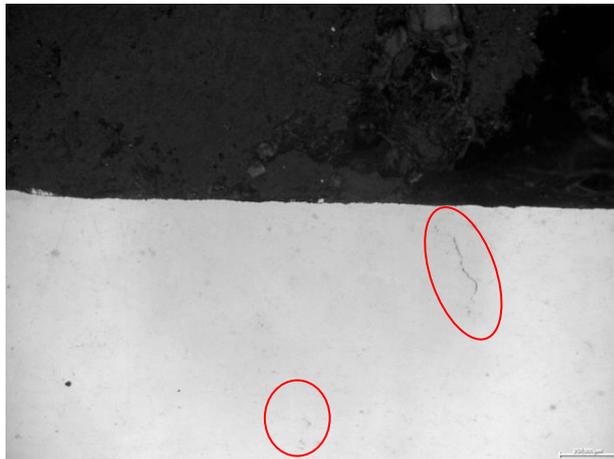
Выполнен анализ пористости образцов, синтезированных из стального легированного порошка (образцы № 1 и № 2), полученные SLM-методом, и проволоки (№ 3 – № 6), полученные разновидностями 3DMP-метода.

С целью исследования технологических возможностей комбинированного термического и деформационного воздействия на синтезируемый материал, послойного или периодического деформационного упрочнения и его влияния на пористость синтезированных деталей, приведены данные для аддитивно-субтрактивно-упрочняющей технологии (АСУТ – образец № 3) с применением волнового деформационного упрочнения (ВДУ) [14 – 16].

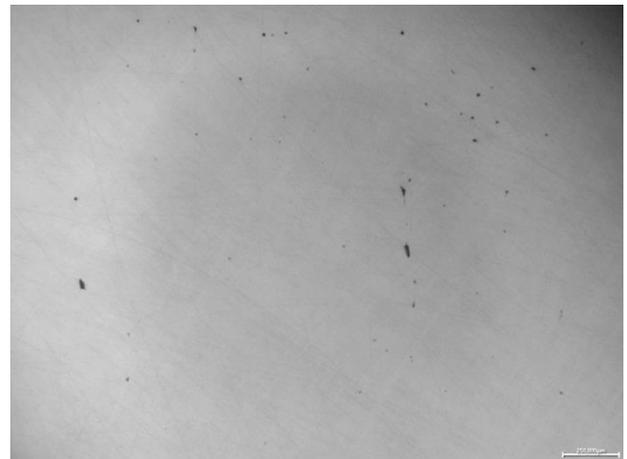
Оценка пористости различных образцов проводилась на основании серии металлографических исследований, определения характерных размеров пор и их количества на исследуемой площади. Расчет размеров и процентного содержания пор проведен в программном обеспечении SIAMS.

Установлено, что синтезированный из по-

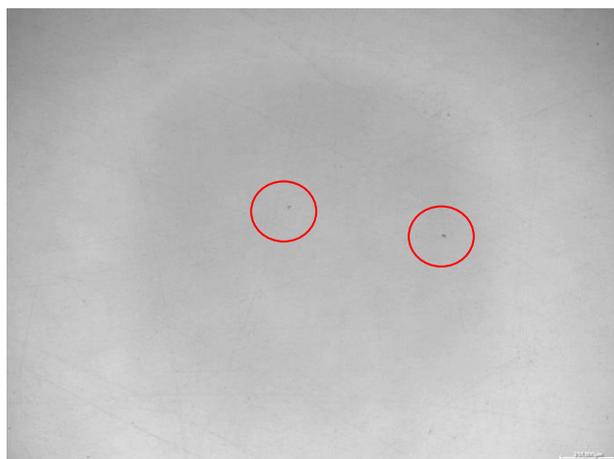
рошка образец № 1 имеет поры размером 0...20 мкм, которые занимают 0,07 % исследуемой площади и содержат микротрещину в подповерхностном слое длиной около 170...430 мкм (рис. 1) Образец № 2 имеет поры размером до 62 мкм, занимающие около 0,29 % исследуемой площади образца (рис. 1).



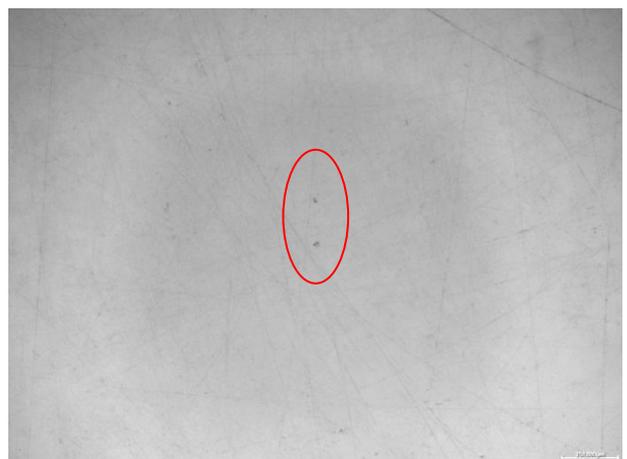
Образец № 1



Образец № 2



Образец № 3



Образец № 4

Рис. 1. Микроструктура синтезированных образцов из проволоки и порошка, $\times 157$

Размер пор в неупрочненном образце № 4, полученном из проволоки 3DMP-методом, составляет до 20 мкм, при этом поры занимают около 0,03 % площади. Применение ВДУ (образец № 3) позволило добиться снижения исследуемых параметров в 2 и более раза: размера пор до 10 мкм и до 0,01 % занимаемой ими площади, а также уплотнить материал.

Данные по образцам № 5 и № 6 взяты из работы [17], в которой приведены результаты исследования макро- и микроструктур образцов, синтезированных различными методами. Синтезированный материал, полученный

СМТ-наплавкой, имеет остаточную пористость, поры размером 12...82 мкм, объем пористости составляет 1,5 %, рис. 2, рис. 3, образец № 6.

Материал, полученный плазменной наплавкой плавящимся электродом хотя и более плотный по сравнению с наплавкой СМТ, но также имеет остаточную пористость, объем которой составляет 0,75 % при размере пор 10...54 мкм, рис. 2, рис. 3, образец № 5.

Анализ размера и площади пор в зависимости от методов изготовления образцов показан на рис. 3.

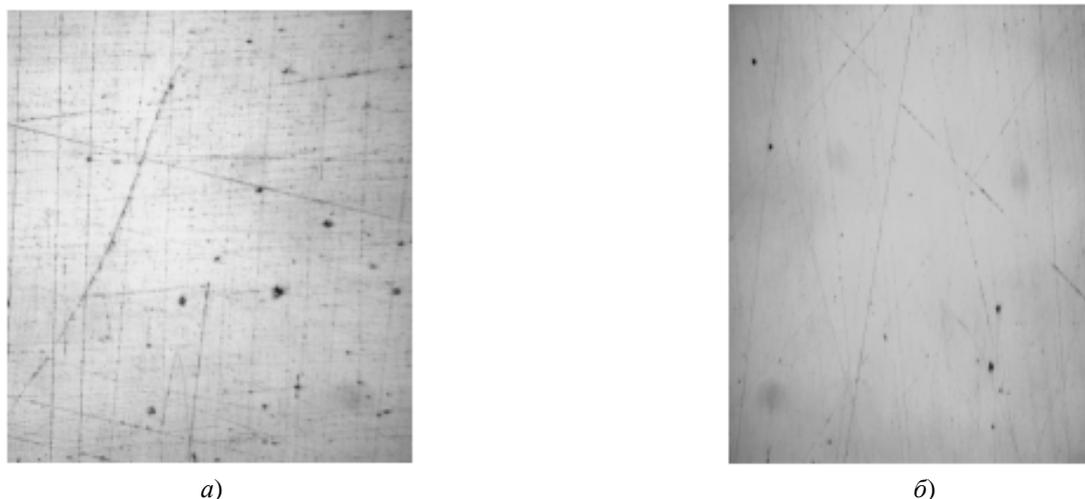


Рис. 2. Пористость в наплавленном материале, $\times 200$:

а – СМТ-наплавка (образец №5); б – плазменная наплавка (образец №6) плавящимся электродом [17]

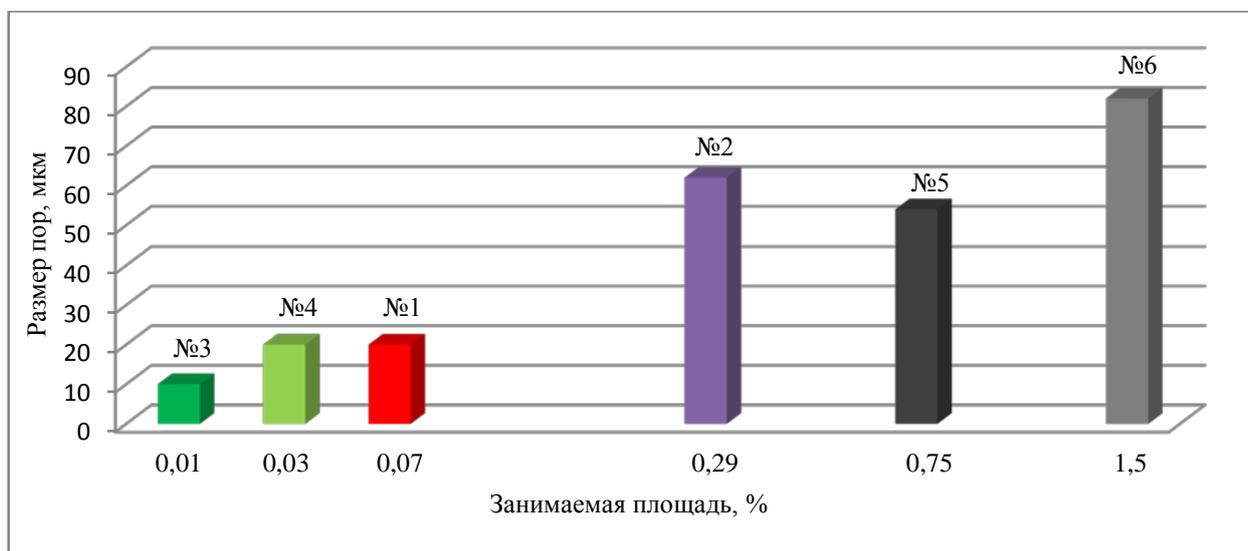


Рис. 3. Размер и площадь пор в зависимости от метода изготовления

Таким образом, наименьшая пористость соответствует образцам № 1, № 3 и № 4. Однако, учитывая наличие микротрещин в образце № 1, данный метод сложно отнести к оптимальным.

Выводы

1. Поры в синтезируемом изделии будут всегда, при использовании в качестве исходного материала и порошка, и проволоки. Это связано с физической сущностью самого аддитивного процесса. Однако диапазон разброса размеров пор, а также занятый порами объем, зависят как от выбранной аддитивной технологии, так и от технологических режимов и среды синтеза.

2. Применение проволоки в качестве исходного материала для процессов аддитивного синтеза целесообразно как с позиции экономической себестоимости готовой детали, так и ее качества. По сравнению с синтезом из порошка, синтезированное из проволоки изделие может быть в разы плотнее, иметь небольшое количество мелких пор.

3. Удачный подбор технологических режимов порошкового синтеза, ужесточение требований к исходному материалу, позволяет в 3 – 4 раза уменьшить как размер пор, так и занятый ими объем. Удачный подбор метода и технологических режимов проволоочного синтеза позволяет в 3 раза уменьшить размер пор и в 20 раз занимаемый ими объем. Более высокое качество изделия всегда обеспечивается

за счет снижения максимально достижимой производительности процесса синтеза.

4. Применение послойного или периодического деформационного упрочнения в процессе проволоочного синтеза (АСУТ с ВДУ) позволяет дополнительно, не менее чем в 2 раза уменьшить размер пор при снижении занимаемой ими площади в 3 раза по сравнению с неупрочненным образцом, синтезированным с теми же технологическими режимами тем же 3DMP-методом.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Калайда, Т.А.** Метод селективного лазерного плавления для создания изделий со сложной геометрией // *Материалы XV Российской ежегодной конференции молодых научных сотрудников и аспирантов «Физико-химия и технология неорганических материалов»*. – Москва, 2018. – С. 55-56.

2. **Особенности** материалов и технологий аддитивного производства изделий / А.Н. Кубанова, А.Н. Сергеев и др. // *Чебышевский сборник*. – 2019. – Т. 20, вып. 3. – С. 453-477.

3. **Зленко, М.А., Нагайцев, М.В., Довбыш, В.М.** Аддитивные технологии в машиностроении: пособие для инженеров. – М. ГНЦ РФ ФГУН «НАМИ», 2015. – 220 с.

4. **Гибсон, Я., Розен, Д., Стакер, Б.** Технологии аддитивного производства. Пер. с англ. / Под ред. И.В. Шишковского. – М.: Техносфера, 2016. – 656 с.

5. **Агеева, Е.В. Алтухов, А.Ю., Сысоев, А.А., Осминина А.С.** Исследование пористости спеченных образцов из электроэрозионных кобальтохромовых порошков // *Известия Юго-Западного государственного университета*. – 2017. – Т. 21. – №6 (75). – С. 51-59.

6. **Оглезнева, С.А.** Структура и свойства стали ПК100Х2Н (аналога ШХ15) [Электронный ресурс] // *Бернштейновские чтения, посвященные 85-летию со дня рождения проф. Бернштейна М.Л.* – 2004. – 64 с. URL: <http://tmo.misis.ru/docs/thesis2004.pdf> (дата обращения 07.04.2020 г.).

7. **Осколков, А.А., Матвеев, Е.В., Безукладников, И.И., Трушников, Д.Н., Кротова, Е.Л.** Передовые технологии аддитивного производства металлических изделий // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение*. – 2018. – Т. 20. – № 3. – С. 90-105.

8. **US 20070122560 (A1).** Solid-free-form fabrication process including in-process component deformation. Robbie J. Adams, Phoenix, AZ. 2007.

9. **Haselhubn, A.S.** Design for Low-Cost Gas Metal Arc Weld-Based Aluminum 3-D Printing, Michigan Technological University, 2016.

10. **Antonysamy, A.A.** Microstructure, Texture and Mechanical Property Evolution During Additive Manufacturing Of Ti6Al4V Alloy for Aerospace Applications, The University of Manchester, 2012.

11. **Stavinoha, J.N.** Investigation of Plasma Arc Welding as a Method for the Additive Manufacturing of Ti-6Al-4V Alloy Components, Montana Tech of The University of Montana, 2012.

12. **Dinovitzer, M., Chen, X., Laliberte, J., Huang, X., Frei, H.** Effect of wire and arc additive manufacturing (WAAM) process parameters on bead geometry and microstructure // *Additive Manufacturing*. – 2019. – Vol. 26. – PP. 138-146.

13. **Киричек, А.В., Сергеев, А.Г., Федонина, С.О.** Влияние технологической среды на качество деталей, синтезированных 3DMP-методом // *Жизненный цикл конструкционных материалов (от получения до утилизации): Материалы XI Всерос. науч.-техн. конф. с международным участием / Под ред. С.А. Зайдеса*. – Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2021. – С. 4-8.

14. **Возможности аддитивно-субтрактивно-упрочняющей технологии / А.В. Киричек, Д.Л. Соловьев и др.** // *Вестник Брянского государственного технического университета*. – 2016. – №4 (52). – С. 151-160.

15. **Аддитивно-субтрактивные технологии – эффективный подход к инновационному производству / А.В. Киричек, О.Н. Федонин и др.** // *Вестник Брянского государственного технического университета*. – 2019. – №8 (81). – С. 4-10.

16. **Киричек, А.В., Соловьев, Д.Л., Федонина, С.О.** Проявление технологической наследственности при исследовании твердости деформационно-термически упрочненных сталей // *Научные технологии в машиностроении*. – 2019. – № 8 (98). – С. 25-28.

17. **Щицын, Ю.Д., Терентьев, С.А., Неулыбин, С.Д., Артемов, А.О., Белнин, Д.С.** Формирование структуры и свойств стали 04Х18Н9 при аддитивном производстве заготовок // *Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение*. – 2018. – № 3. – Т. 20. – С. 55-62.

REFERENCES

1. Kalaida, T.A. The method of selective laser melting for the creation of products with complex geometry, Proceedings of the XV Russian annual conference of young researchers and postgraduates «Physico-chemistry and technology of inorganic materials», Moscow, 2018, pp. 55-56.

2. Features of materials and technologies of additive manufacturing of products / A.N. Kubanova, A.N. Sergeev et al./ *Chebyshevsky collection*, 2019, vol. 20, issue 3, pp. 453-477

3. Zlenko M.A., Nagaytsev M.V., Dovbysh V.M. Additive technologies in mechanical engineering. Moscow, SSC RF FSUE «NAMI», 2015, 220 p. (In Russian).

4. Gibson, Ya., Rosen, D., Stacker, B. Technologies of additive manufacturing. Translated from English / Edited by I.V. Shishkovsky. Moscow.: Technosphere, 2016, 656 p.
5. Ageeva, E.V., Altukhov, A.Yu., Sysoev, A.A., Osminina A.S. Investigation of porosity of sintered specimen from electroerosive cobalt-chromium powders / Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta, 2017, vol.21, no.6 (75), pp. 51-59.
6. Oglezneva, S.A. Structure and properties of steel PK100X2N (analog SHX15) [Electronic resource] // Bernstein readings dedicated to the 85th anniversary of the birth of Prof. Bernstein M.L., 2004, 64 p. URL:<http://tmo.misis.ru/docs/thesis2004.pdf> (accessed 07.04.2020).
7. Oskolkov, A.A., Matveev, E.V., Bezukladnikov, I.I., Trushnikov, D.N., Krotova, E.L. Advanced technologies for additive manufacturing of metal product. Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science, 2018, vol. 20, no. 3, pp. 90-105. Doi: 10.15593/2224-9877/2018.3.11.
8. US 20070122560 (A1). Solid-free-form fabrication process including in-process component deformation. Robbie J. Adams, Phoenix, AZ. 2007.
9. Haselhuhn, A.S. Design for Low-Cost Gas Metal Arc Weld-Based Aluminum 3-D Printing, Michigan Technological University, 2016.
10. Antonysamy, A.A. Microstructure, Texture and Mechanical Property Evolution During Additive Manufacturing Of Ti6Al4V Alloy for Aerospace Applications, The University of Manchester, 2012
11. Stavinoha, J.N. Investigation of Plasma Arc Welding as a Method for the Additive Manufacturing of Ti-6Al-4V Alloy Components, Montana Tech of The University of Montana, 2012.
12. Malcolm Dinovitzer, Xiaohu Chen, Jeremy Laliberte, Xiao Huang, Hanspeter Frei Effect of wire and arc additive manufacturing (WAAM) process parameters on bead geometry and microstructure // Additive Manufacturing. – 2019. – Vol. 26. – PP. 138-146.
13. Kirichek, A.V., Sergeev, A.G., Fedonina, S.O. Technological environment effect on the quality of parts synthesized by the 3DMP method. Structural materials life cycle (from receipt to recovery). Proc. of XI all-Russian sci.-tech. conf. with international participation / Edited by S.A. Zaides. Irkutsk: IRNTU Publishing House, 2021, pp. 4-8.
14. Possibilities of additive-subtractive-strengthening technology / A.V. Kirichek, D.L. Soloviev et al. Bulletin of the Bryansk State Technical University, 2016, no.4 (52), pp. 151-160.
15. Additive-subtractive technologies – an effective approach to innovative production / A.V. Kirichek, O.N. Fedonin et al. Bulletin of the Bryansk State Technical University, 2019, no.8 (81), pp. 4-10
16. Kirichek, A.V., Soloviev, D.L., Fedonina, S.O. Manifestation of technological heredity in the study of hardness of deformation-thermally hardened steels / Science intensive technologies in mechanical engineering, 2019, no. 8 (98), pp. 25-28.
17. Shchitsyn, Yu.D., Terentyev, S.A., Neulybin, S.D., Artemov, A.O., Belyanin D.S. Structuring and developing properties of steel 04X18N9 in additive work-piece manufacturing. Bulletin of PNRPU. Mechanical engineering, materials science, 2018, no. 3, vol. 20, pp. 55-62.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 21.11.2021; одобрена после рецензирования 24.01.2022; принята к публикации 30.01.2022.

The article was submitted 21.11.2021; approved after reviewing 24.01.2022; accepted for publication 30.01.2022.